FRACTIONNEMENT ET CARACTÉRISATION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS LES RENDZINES

par

N. CHOULIARAS (*), J.C. VEDY (**), F. JACQUIN (*)
Collaboration technique : J.M. PORTAL (**)

I. INTRODUCTION

Les études entreprises ces dernières années sur la dynamique de la matière organique des sols en climat tempéré, ont montré que les humus calciques de rendzine présentaient paradoxalement des caractères analytiques plus proches de ceux des moder acides que de ceux des mull à forte activité biologique et à complexe absorbant saturé. Les premiers résultats du fractionnement, pratiqué avec des techniques encore incomplètes, ont cependant révélé deux faits essentiels : d'une part, la faible évolution des précurseurs solubles attestée par l'abondance des acides fulviques et par la prédominance des acides humiques bruns sur les acides humiques gris plus polymérisés (DUCHAUFOUR et JACQUIN, 1966 ; CALVEZ, 1970, DORMAAR et al., 1970), d'autre part, la transformation modérée de certains constituants insolubles de la matière organique fraîche qui vient d'être signalée par MULLER (1972).

Le rôle du calcaire actif dans la genèse de ce type d'humus, bien que pressenti depuis longtemps, demeure cependant encore mal défini ; en effet, les difficultés rencontrées dans ce genre d'étude sont nombreuses, certaines d'entre elles tenant à des causes d'ordre méthodologique ; les techniques de fractionnement mises au point au Centre de Pédologie-biologique de Nancy au cours de ces dix dernières années (DUCHAUFOUR et JACQUIN, 1963 ; DUCHAUFOUR et JACQUIN, 1966 ; VEDY, 1973) ne semblent convenir qu'aux sols acides ; c'est pourquoi notre premier objectif a été d'adapter nos méthodes aux problèmes posés par la présence de carbonate de calcium. Nous avons ensuite essayé de préciser l'évolution des précurseurs solubles et des fractions insolubles de la matière organique fraîche en présence de calcaire actif et d'ions Ca^{2+}; pour cela nous nous sommes basés à la fois sur les résultats de ces fractionnements et des techniques plus récentes telle que la microscopie électronique à balayage.

Pour diriger nos recherches, nous nous sommes basés sur certains travaux antérieurs : d'une part sur les travaux de JACQUIN et LE TACON (1970) qui ont montré que le carbonate de calcium pouvait protéger physiquement la lignine oxydée de la biodégradation ; d'autre part, sur les travaux plus récents de TOUTAIN (1974) qui a constaté, par voie expérimentale, que l'ion Ca^{2+} freinait la formation d'humine d'insolubilisation.

(*) I.N.P.L. Laboratoire Matière Organique et Environnement.
(**) C.N.R.S. Centre de Pédologie-Biologique.

II. CARACTERISTIQUES DU MATERIEL

Le mull calcique pris comme matériel d'étude provient de l'horizon superficiel (0 à 6 cm) d'une rendzine forestière colluviale formée en plaine lorraine (altitude 260 m) sur un mélange de fragments de calcaires bajociens et de Terra fusca (Lieu dit Belle Fontaine). La végétation est une hêtraie à Charme à sous-étage d'érables champêtres et de noisetiers; la flore herbacée y est abondante et caractéristique des mull actifs : la description détaillée et l'analyse complète étant donnée par ailleurs (DOMMERGUES et DUCHAUFOUR, 1966), nous ne rappellerons ici que les principales caractéristiques.

Prof. cm	Hor.	Granulométrie %					$CaCO_3$ %	C % org.	N % total	C/N	pH
		S.G.	S.F.	L.G.	L.F.	A.					
0-6	A_1	20,2	4,4	7,8	18,6	21,7	22,5	14,05	1,1	12,8	7,4

Prof. cm	Hor.	Cations échang. m.e./100 g						$100 \frac{S}{T}$	Elém. libres ‰		
		Ca	Mg	K	Na	S	T		Si	Al	Fe
0-6	A_1	Sat.	13,1	0,9	—	—	59,9	Sat.	—	—	6,4

Date de prélèvement : 7 mai 1974.

Description du profil (DOMMERGUES et DUCHAUFOUR, 1966) :

A_1 (0-6 cm)

Litière de Hêtre; mull brun sombre, à structure grumeleuse. Très nombreux petits cailloux calcaires, anguleux. Limite diffuse avec A_1C.

A_1C (6-40 cm)

Brun jaune, structure prismatique à éléments très friables. Nombreux cailloux anguleux (1-2 cm de diamètre), dispersés parallèlement à la surface du sol. Texture légèrement plus argileuse.

C_1

Calcaire bajocien délité. Coloration blanc jaune. Le profil est de type AC. Le calcaire actif est plus abondant en profondeur. Le pH de surface est plus faible qu'en profondeur.

III. DEFINITIONS ET METHODES DE FRACTIONNEMENT DE L'HUMUS

A) **Matières organiques libres** (fraction S-1)

Cette fraction correspond essentiellement aux matières organiques fraîches libres de liaison avec la matière minérale des sols. Elle est séparée de la fraction organique liée (culot C-1) par densimétrie de l'échantillon de sol dans un mélange de bromoforme et d'éthanol ajusté à des densités généralement comprises entre 1,5 et 2,0 selon le principe de MONNIER et al. (1962) à l'aide d'un protocole modifié mettant en jeu l'agitation mécanique et la centrifugation (DUCHAUFOUR et JACQUIN, 1966; MERLET, 1971). Pour cette étude, nous utilisons la densité de 1,8 et un rapport sol/liqueur dense de 1/20.

B) **Matières organiques séquestrées** (fractions S-2 et S-3)

La transformation plus ou moins complète de certains constituants insolubles des membranes végétales, notamment de la lignine, conduit à la formation d'un type particulier d'humine dite résiduelle ou héritée. Ce type d'humine est en fait très hétérogène : il comprend en effet tous les termes de passage entre, d'une part des produits peu remaniés encore proches de la matière organique originelle mais *séquestrés* par des liens physiques au sein d'agrégats, d'autre part des molécules plus complexes *liées* essentiellement par l'intermédiaire de groupements carboxyles à d'autres composés organiques et à la fraction silicatée des sols. On comprendra dès lors que la matière organique séquestrée soit très difficile à séparer, d'une part de la matière organique

libre, d'autre part de l'humine néoformée et de l'humine résiduelle liée.

En milieu acide, la matière organique séquestrée a pu être isolée en presque totalité, grâce à l'emploi simultané des ultra-sons et du mélange bromoforme-éthanol (d = 1,8) suivant un protocole décrit par ailleurs (VEDY, 1973), directement applicable au culot de centrifugation C-1.

Dans les humus de rendzine, par contre, la matière organique séquestrée est beaucoup plus difficile à isoler qu'en milieu acide ou neutre. En effet, les ultra-sons ne peuvent assurer à eux seuls la désagrégation du ciment organo-calcique qui, en enrobant les éléments organiques, en empêche la flottation dans la liqueur dense. L'utilisation d'un acide fort solubilisant le calcaire actif préalablement à l'emploi de la liqueur dense et des ultra-sons, apparaît donc comme une méthodologie pouvant logiquement conduire à une séparation efficace de ce type de matière organique. Cependant, comme nous le verrons par la suite, la décarbonation du culot C-2 perturbe sensiblement l'extraction des acides fulviques et humiques par les réactifs alcalins. Pour cette raison, nous opérons en deux temps ce qui nous permet de distinguer deux niveaux différents dans l'intensité de la séquestration de la matière organique :

1) La matière organique faiblement séquestrée (fraction S-2) isolée en appliquant au culot de centrifugation C-1 un protocole identique à celui utilisé pour les sols acides ou neutres;
2) La matière organique fortement séquestrée (fraction S-3) séparée par action conjuguée des ultra-sons et de la liqueur dense (d = 1,8) sur le culot C-3, c'est-à-dire après extraction des acides fulviques et humiques par les réactifs alcalins, puis décarbonatation ménagée par HCl 2N jusqu'à pH 4.

C) **Composés extractibles** (fractions AF et AH)

Ils comprennent les acides fulviques (AF) et les acides humiques (AH), ces derniers précipitables à pH 2. Dans cette étude, nous comparons tout d'abord à la méthode utilisée habituellement au Centre de Pédologie biologique de Nancy, désignée par « protocole 1 », une méthode « cinétique » par épuisements successifs, appelée « protocole 2 ». Le protocole 1 comporte successivement deux extractions par l'hydroxyde de sodium tamponné à pH 9,7 par le tétraborate de sodium, une extraction par le pyrophosphate de sodium à pH 9,8, trois extractions par l'hydroxyde de sodium N/10 à pH 12; le rapport sol/liqueur d'extraction varie de 1/10 à 1/100 suivant la teneur globale en carbone de l'échantillon de sol; la durée de la première extraction par un réactif est de 60 minutes, celle des suivantes, de 30 minutes seulement (PORTAL et al., 1975). Le protocole 2 utilise ces mêmes réactifs et dans un ordre semblable au protocole 1 ; cependant, chaque réactif est réemployé jusqu'à un palier d'extraction matérialisé par la présence d'un liquide peu coloré ; la durée de la première extraction, puis des suivantes, est semblable à celle du protocole 1; par ailleurs, pour limiter les phénomènes d'autoxydation de la matière organique, il convient de travailler sous atmosphère inerte d'azote. Pour ces deux protocoles, nous utilisons un rapport sol/solution d'extraction de 1/20.

Nous étudions en outre dans les protocoles 1 et 2, l'influence de la décarbonatation du culot C-2, c'est-à-dire après séparation des fractions S-1 et S-2, sur l'extraction des acides fulviques et humiques par les réactifs alcalins; cette décarbonatation s'effectue, comme on l'a signalé plus haut, avec de l'acide chlorhydrique 2N jusqu'à pH 4.

D) **Les humines de néoformation et l'humine résiduelle liée** (fractions H-1 et H-2)

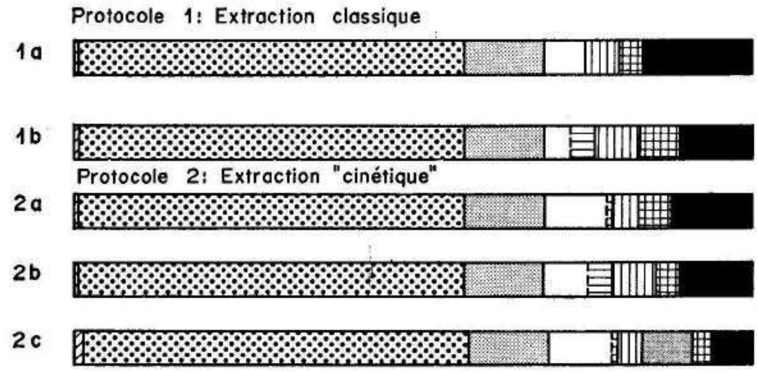
Les humines de néo-formation comprennent essentiellement l'humine d'insolubilisation bio-physico-chimique provenant de l'insolubilisation et de la polymérisation des précurseurs phénoliques, et l'humine microbienne à base de polysaccharides.

Elle peut être globalement fractionnée en deux parties :

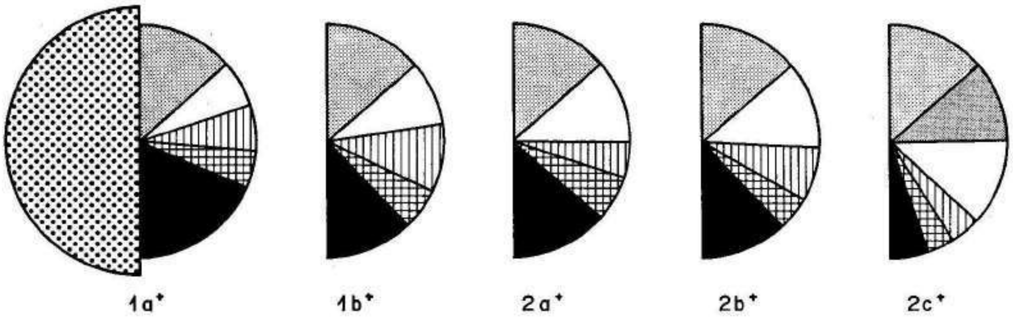
— l'une extractible par la soude, après déferrification par le dithionite, puis destruction des minéraux silicatés suivant un protocole mis au point par PERRAUD et al. (1971) et appelée H-1;

— l'autre restant insoluble et appelée H-2.

La fraction extractible correspond essentiellement à l'humine d'insolubilisation bio-physico-chimique insolubilisée par le fer et liée aux argiles; la fraction non extractible comporte, outre les humines de néoformation, une proportion plus ou moins grande d'humine résiduelle liée.



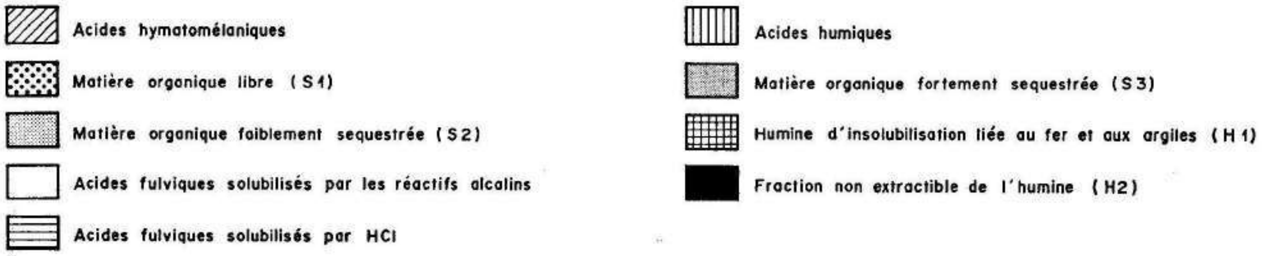
Graphique 1: Influence du protocole sur le fractionnement



* Protocoles : Se rapporter au § III du texte

C total organique 14050mg ; C des fractions libres 8009mg ; C des fractions liées 6041mg

Graphique 2 : fractions des composés humiques



Les protocoles utilisés pour cette étude peuvent être schématisés ainsi :

Protocole 1 : extraction classique des acides fulviques et humiques par les réactifs alcalins.

Protocole 1a : S-1, S-2*, (AF + AH), H-1, H-2.

Protocole 1b : S-1, S-2*, décarbonatation, (AF + AH), H-1, H-2.

Protocole 2 : extraction « cinétique » des acides fulviques et humiques par les réactifs alcalins.

Protocole 2a : S-1, S-2*, (AF + AH), décarbonatation, H-1, H-2.

Protocole 2b : S-1, S-2*, décarbonatation, (AF + AH), H-1, H-2.

Protocole 2c : S-1, S-2*, (AF + AH), décarbonatation, S-3*, H-1, H-2.

S-1 = matière organique libre ; S-2 = matière organique résiduelle faiblement séquestrée ; S-3 = matière organique résiduelle fortement séquestrée ; H-1 et H-2 = humine de néoformation + humine résiduelle liée.

---

* Ultra-sons.

L'étude comparée des fractions surnageantes S-1, S-2 et S-3 a été effectuée par microscopie électronique à balayage (stéréoscan). La détermination du rapport C/N de ces fractions a été faite par l'analyseur élémentaire CARLO ERBA, modèle 1104 (PORTAL et al., 1975).

IV. RESULTATS

A) **Composés extractibles** (fractions AF et AH)

Deux paramètres nous permettent de les caractériser : d'une part le taux d'extraction, d'autre part le rapport acides fulviques/acides humiques (AF/AH).

1. *Comparaison des taux d'extraction* (tableaux 2 et 3)

Le taux d'extraction correspond habituellement au rapport $100 \frac{AF + AH}{C \text{ total}}$ dans lequel AF et AH représentent respectivement le carbone des acides fulviques et des acides humiques extractibles par les réactifs alcalins, et C total, le carbone total de l'échantillon de sol.

Dans les protocoles 1b et 2a, 2b, 2c, nous incluons dans les composés extractibles la fraction fulvique solubilisée par l'acide chlorhydrique durant la décarbonatation.

La comparaison des taux d'extraction (tableau 3) entre, d'une part les protocoles 1a et 2a, d'autre part les protocoles 1b et 2b, fait apparaître les points essentiels suivants :

- l'extraction « cinétique » par épuisements successifs (protocole 2a) augmente d'environ 18 % les fractions fulviques et humiques;
- lorsque la décarbonatation précède les extractions par les réactifs alcalins, le taux de solubilisation des composés fulviques et humiques est sensiblement accru, passant ainsi de 11 % (protocole 1a) à 15 % (protocole 1b), de 14 % (protocole 2a) à 17 % (protocole 2b).

L'ensemble de ces résultats montre par ailleurs que cet accroissement du taux d'extraction paraît s'effectuer aux dépens des fractions H-1 et H-2 de l'humine, ce que nous confirmerons par la suite.

2. *Comparaison des rapports AF/AH* (tableau 3)

Le rapport AF/AH donne des indications sur le degré de condensation des composés extractibles : plus ce rapport est élevé, plus la polymérisation est faible.

TABLEAU 2. — Taux d'extraction (en % du carbone du culot densimétrique C-2)

Réactifs	1a		1b		2a		2b		2c	
	AF	AH	AF	AH	AF	AH	AF	AH	AF	AH
Soude-tétraborate ..	4,59	0,41	2,73	13,04	10,36	1,90	10,23	8,66	10,36	1,90
Pyrophosphate	5,66	5,51	3,45	0,35	11,33	7,20	4,10	3,13	11,33	7,20
Soude	8,47	11,53	5,18	10,32	8,86	2,41	6,90	8,77	8,86	2,41
Liquide de décarbonatation			12,21		2,70		12,21		2,70	
Somme	18,72	17,45	23,57	23,71	33,25	11,51	33,44	20,56	33,25	11,51

TABLEAU 3 — Comparaison des résultats du fractionnement des composés humiques par différents protocoles

Protocole	Taux d'extraction en % du C total	Rapports AF/AH				C extrait par HCl en % de C total	H-1 + H-2 en % de C total
		Globaux	Soude-tetra	Pyro	Soude		
1a	11	1	11,2	1	0,7	—	19,6
1b	15	1	0,2	9,1	0,5	3,75	16,2
2a	14	2,9	5,5	1,2	3,7	0,83	17,3
2b	17	1,6	1,2	1,3	0,8	3,75	14,1
2c	14	2,9	5,5	1,2	3,7	0,83	8,3

Le rapport AF/AH global tient compte des acides fulviques extraits par le traitement à HCl.

Par les méthodes classiques d'extraction, les rapports AF/AH globaux sont égaux ou légèrement supérieurs à 1 ; il est important de noter que la décarbonatation ne modifie pas la valeur de ceux-ci. Par contre, si on calcule ce rapport pour chaque réactif d'extraction, on constate que la décarbonatation en modifie quelque peu la valeur. Le rapport AF/AH des extraits soude-tétraborate diminue, une partie des composés fulviques étant solubilisée par l'acide chlorhydrique ; par contre, le rapport AF/AH des extraits pyrophosphate augmente : ceci pourrait signifier que la décarbonatation permet à ce réactif d'extraire des composés fulviques primitivement insolubilisés par l'ion Ca^{2+}.

La méthode « cinétique » par épuisements successifs (protocole 2), comparée aux méthodes habituelles d'extraction, donne des rapports AF/AH globaux nettement plus élevés, compris entre 1,6 et 2,9, la valeur minimale étant obtenue avec le protocole 2b comportant la décarbonatation du culot de centrifugation C-2. Si on calcule ce rapport pour les extraits soude-tétraborate et soude, on remarque comme précédemment, qu'il est nettement plus petit après traitement acide.

B) **Fractions surnageantes** (graphique 1)

1. *Matière organique libre* (fraction S-1)

Elle représente 57 % du carbone total. Son étude morphoscopique au microscope électronique à balayage montre qu'elle est formée de débris végétaux et de quelques filaments fungiques. Son rapport C/N est peu élevé, de l'ordre de 15.

2. *Matière organique faiblement séquestrée* (fraction S-2)

Elle constitue 12 % du carbone total, soit 28 % du carbone lié. Au stéréoscan, les fractions S-1 et S-2 apparaissent peu différentes ; toutefois, cette dernière paraît comporter une proportion plus grande de mycéliums incrustés par un ciment organo-calcique à la surface duquel adhèrent des particules minérales (photos 1 et 2).

Son rapport C/N est moins élevé que celui de la matière organique libre, de l'ordre de 13.

3. *Matière organique fortement séquestrée* (fraction S-3)

Elle représente 8 % du carbone total, soit 19 % du carbone lié. Cette fraction récupérée par le protocole 2c qui comporte, comme on l'a vu précédemment, une décarbonatation suivie par une séparation densimétrique avec ultra-sons, peut être assimilée à l'humine résiduelle séquestrée.

Son étude morphoscopique montre qu'elle est constituée d'une part de débris organiques figurés et de filaments fungiques, d'autre part de produits carbonés non figurés, provenant très vraisemblablement d'une transformation poussée des constituants de la litière, enfin de minéraux silicatés ; du fait de la décarbonatation, les résidus organiques n'apparaissent plus revêtus du précipité de carbonate de calcium, mais ils demeurent néanmoins bloqués au sein des agrégats organo-minéraux (photos 3 et 4). L'efficacité du protocole 2c à isoler l'humine résiduelle séquestrée, est confirmée par l'examen morphoscopique du résidu non extractible : la recherche d'éléments organiques plus ou moins transformés s'y révélant infructueuse, on peut donc admettre que le carbone de ce résidu correspond, d'une part aux humines de néoformation, d'autre part à l'humine résiduelle liée (photo 5).

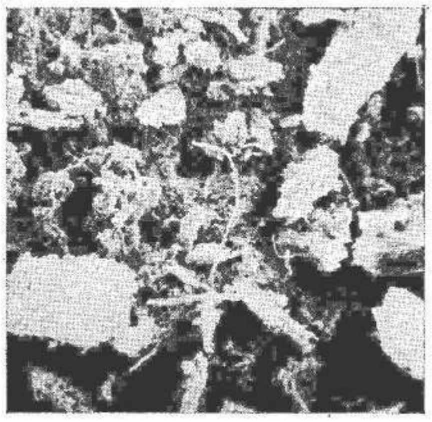


Photo 1, X 120
Matière organique faiblement séquestrée (S-2)

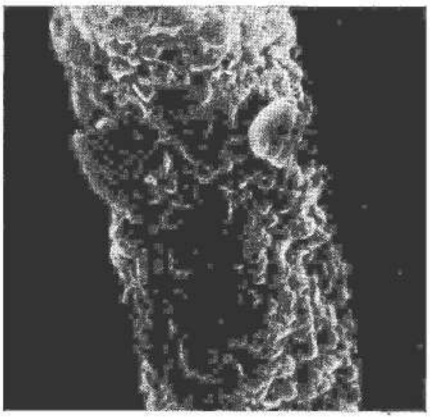


Photo 2, X 5000
Matière organique faiblement séquestrée (S-2)

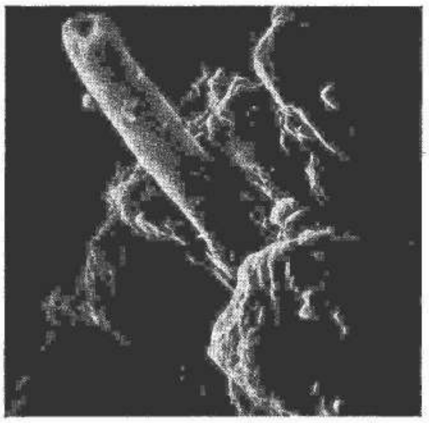


Photo 3, X 2600
Agrégats organo-minéraux décarbonatés

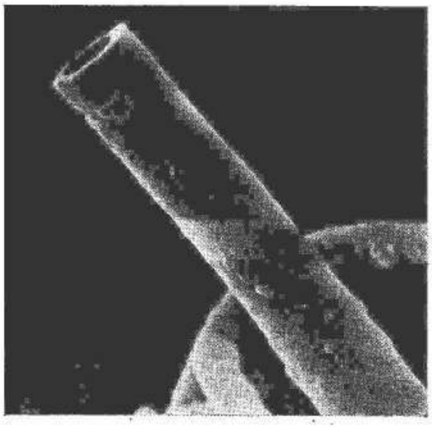


Photo 4, X 5500
Agrégats organo-minéraux décarbonatés

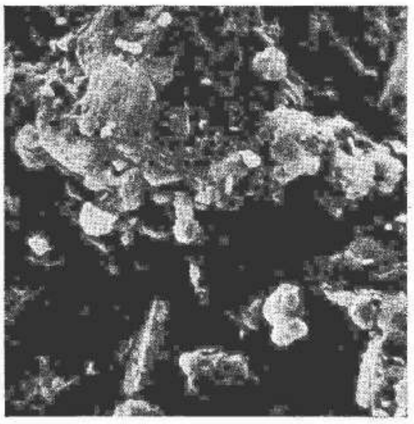


Photo 5, X 5000
Humine résiduelle

Le rapport C/N de cette fraction S-3 est faible, et oscille autour de la valeur 10.

C) **Les humines de néoformation et l'humine résiduelle liée**
(fractions H-1 et H-2, graphique 1, tableau II)

Les fractions H-1 et H-2 résultant de l'application du protocole 2c représente globalement 8,3 % environ du carbone total, soit environ 20 % du carbone lié (C_1).

La fraction H-1 soluble dans la soude à pH 12 après déferrification, puis destruction des minéraux silicatés, est minoritaire par raport à la fraction H-2 non extractible ; elle représente en effet moins de 35 % du carbone des fractions H-1 + H-2.

V. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Les résultats du fractionnement de la matière organique d'un mull de rendzine par les différents protocoles choisis pour cette étude nous permettent d'apporter un complément d'information sur l'humification des sols riches en carbonate de calcium actif, et de proposer une méthodologie applicable à ces types d'humus.

La représentation graphique de ces résultats (graphique 2) met en évidence les points essentiels suivants :

1. *Une teneur en carbone organique supérieure à 10 %,* valeur très élevée si on la compare aux teneurs moyennes des mull acides et des moder généralement comprises entre 2 et 8 %.

2. *La prédominance de matière organique libre,* qui, comme dans les humus bruts, représente plus de la moitié du carbone total.

3. *L'abondance des acides fulviques,* se traduisant par un rapport AF/AH très nettement supérieur à 1, indique des mécanismes d'évolution différents de ceux rencontrés dans d'autres mull.

Le fait qu'une décarbonatation ménagée, pratiquée avant ou après l'extraction par les réactifs alcalins puisse augmenter les fractions fulviques aux dépens de l'humine, nous paraît devoir revêtir une signification pédogénétique fondamentale ; en effet, on peut admettre à la vue de ces résultats, que les précurseurs solubles originaires de la litière s'insolubilisent principalement par floculation sous l'influence de l'ion Ca^{2+} provenant d'une dissolution partielle du calcaire actif; ce processus pouvant être très rapide et donner lieu à une réaction chimique totale du fait de l'abondance des ions Ca^{2+}, il en résulte un *blocage de la polymérisation à un stade précoce, confirmé par les faibles teneurs en humine d'insolubilisation.*

L'ion Ca^{2+} jouerait ainsi, vis-à-vis de l'insolubilisation des précurseurs, un rôle comparable à celui de l'ion Fe^{3+} en milieu acide ; néanmoins une *divergence entre les mull calciques et acides* nous paraît devoir être signalée : dans les mull de rendzines, les composés floculés par le calcium sont en majeure partie extractibles par les réactifs décomplexants tels le pyrophosphate de sodium, la fraction incorporée à l'humine libérée par décarbonatation étant minoritaire et peu polymérisée ; dans les mull acides par contre, les composés précipités par le fer se condensent davantage et constituent une part importante de l'humine d'insolubilisation fortement liée aux argiles (VEDY, 1973 ; TOUTAIN, 1974 ; HANRION, 1974 ; GUILLET et SOUCHIER, 1974).

L'étude des processus d'humification par insolubilisation des précurseurs nous permet *d'opposer les mull de rendzines aux mull de chernozems.* Bien que dans ces deux types d'humus, ce soit toujours les ions Ca^{2+} qui soient responsables de la floculation des précurseurs (JACQUIN, 1963), l'évolution des produits immobilisés est tout à fait différente ; dans les mull de rendzines, nous avons vu que le degré de condensation demeurait faible; à l'opposé, dans les mull de chernozems les contrastes climatiques très accentués conduisent à une maturation des composés humiques néoformés de sorte que l'humine d'insolubilisation y est très abondante et très stable du fait de sa condensation.

4. *Une quantité importante d'humine résiduelle séquestrée* (fraction S-3). Elle représente en effet, avec la matière organique faiblement séquestrée (fraction S-2), environ 47 % du carbone lié, contre 20 % seulement pour l'humine d'insolubilisation. Ce résultat *oppose ainsi très nettement le mull calcique de rendzine au mull acide* dont l'humine résiduelle séquestrée (7 %) est minoritaire par rapport à l'humine d'insolubilisation (58 %) (DUCHAUFOUR, 1975).

A l'inverse, *les teneurs en humine résiduelle rapprochent le mull calcique du moder,* humus également caractérisé par la prédominance de la matière organique séquestrée (45 %) sur l'humine d'in-

solubilisation (31 %). Mais cette ressemblance n'est que d'ordre quantitatif et ne préjuge pas des mécanismes. En effet, l'activité biologique oppose très nettement ces deux milieux ; dans les moder, elle est faible, d'où le ralentissement de la minéralisation et de l'humification de la matière organique fraîche ; dans les mull calciques, elle est au contraire très élevée et se traduit d'abord par une biodégradation intense mais cependant limitée par une reprécipitation du carbonate de calcium autour des débris végétaux et des agrégats argilo-fumiques ce qui ralentit ainsi les cinétiques d'évolution ultérieures des diverses fractions organiques.

En conclusion, ces résultats nous amènent, à proposer une méthode de fractionnement adaptée aux humus calciques que nous schématiserons ainsi :

— séparation de la matière organique libre et faiblement séquestrée par densimétrie et ultra-sonication ;

— extraction des acides fulviques et des acides humiques successivement par la soude-tétraborate, le pyrophosphate de sodium, l'hydroxyde de sodium ;

— décarbonatation par l'acide chlorhydrique jusqu'à pH 4 ;

— séparation de la matière organique fortement séquestrée par densimétrie et ultra-sonication ;

— fractionnement de l'humine (séparation de la matière organique insolubilisée par le fer et les argiles) et examen en microscopie électronique.

En résumé l'humification des mull de rendzines se rapproche, paradoxalement, dans son résultat final, de celle des humus acides de type moder ; *dans les deux cas la matière organique fraîche a tendance à s'accumuler sous une forme peu transformée encore proche des débris originels, l'humine résiduelle prédomine sur l'humine d'insolubilisation, le rapport AF/AH est nettement supérieur à* 1. Cependant, comme l'ont encore rappelé récemment DUCHAUFOUR et JACQUIN (1974), les conditions écologiques et les processus biochimiques sont en fait très différents : en milieu acide, le fer et les argiles jouent un rôle pilote dans les processus d'humification ; à l'opposé dans les humus de rendzines, le calcium intervient sous forme d'ions Ca^{2+} pour floculer les précurseurs solubles originaires de la litière, mais également sous forme de carbonate de calcium pour bloquer à la fois la biodégradation et l'humification de la matière organique ; cette action stabilisante s'exerce aussi bien sur des composés peu transformés, avec formation d'humine séquestrée, que sur des composés humifiés, mais peu polymérisés.

BIBLIOGRAPHIE

CALVEZ (C.), 1970. — Contribution à l'étude des processus d'extraction et de caractérisation des composés humiques. Thèse 3ᵉ Cycle, Université Nancy I.

DORMAAR (J.F.), JACQUIN (F.), METCHE (M.), 1970. — Extraction and purification of humic acids from a rendzina A_h and a podzol B_h horizon. *Soil Biol. Biochem.*, **2**, 285-293.

DUCHAUFOUR (Ph.), 1975. — La dynamique de la matière organique des sols tempérés. Son rôle dans la genèse des sols. *Geoderma,* sous presse.

DUCHAUFOUR (Ph.), JACQUIN (F.), 1966. — Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bull. E.N.S.A.N., VIII* (1), 3-24.

DUCHAUFOUR (Ph.), JACQUIN (F.), 1974. — Note sur l'humification en milieu forestier. *Science du sol*, sous presse.

HANRION (Myriam), 1974. — Contribution à l'étude de l'évolution des hydrosolubles organiques de Hêtre en milieu acide. Thèse Doctorat de Spécialité, Université Nancy I.

JACQUIN (F.), LE TACON (F.), 1970. — Influence des formes de calcium sur l'évolution des résidus ligneux sous climat tempéré. Bull. E.N.S.A.I.A., *XII* (1-2), 12-20.

JACQUIN (F.). 1963. — Contribution à l'étude des processus de la formation et de l'évolution des divers composés humiques. Thèse Doctorat d'Etat, Université Nancy, Bull. E.N.S.A.N., 156 p.

MERLET (D.), 1971. — Mise au point technique concernant l'extraction et la caractérisation des composés organiques présents dans les sols. Note Technique n° 15, C.P. B. Nancy.

MULLER (J.), 1972. — Identification des formes de la matière organique dans les sols de la Champagne crayeuse. Ann. Agron., **23** (6), 587-610.

MONNIER (G.), TURC (L.), JEANSON-LOU SIANG (C.), 1962. — Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. Ann. Agron. **13** (1), 55-63.

PERRAUD (A.), 1971. — La matière organique des sols forestiers de Côte d'Ivoire. Thèse Doctorat d'Etat, Université Nancy I.

PORTAL (J.M.), VEDY (J.C.), JACQUIN (F.). — Nouvelles techniques de fractionnement de la matière organique des sols (sous presse).

TOUTAIN (F.), 1974. — Etude écologique de l'humification dans les hêtraies acidiphiles. Thèse Doctorat d'Etat, Université Nancy I.

VEDY (J.C.), 1973. — Relation entre le cycle biogéochimique des cations et l'humification en milieu acide. Thèse Doctorat d'Etat, Université Nancy I.

VEDY (J.C.), DUCHAUFOUR (Ph.), JACQUIN (F.), 1973. — Relation entre le cycle du calcium et l'humification. C.R. Acad. Sci. Paris, **276**, 1665-1668.

View publication stats